2К

УДК 621.317.3

В.П. Куценко
Казенне науково-виробниче підприємство «Кварсит», м. Костянтинівка, Україна
Державний університет інформатики і штучного інтелекту, м. Донецьк, Україна
donetsk50@mail.ru

Огляд та класифікація методів та засобів вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів

У статті проведений огляд і класифікація методів і засобів вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів. Розглянута класифікація радіотехнічних систем за їхнім функціональним призначенням, за видом і потужністю вимірюваних сигналів, за структурою перетворення і вимірювання. Зроблено огляд особливостей пристрою приймально-перетворювального тракту радіометрів і вимірювання низькоінтенсивних НВЧ-сигналів за допомогою контактних і дистантних методів.

Вступ

При вимірюванні параметрів електромагнітних сигналів використовуються радіотехнічні системи (РТС), які являють собою систему електричних кіл, вузлів і блоків, призначених для прийому і перетворення радіохвиль, що поширюються у відкритому просторі, природного або штучного походження [1], [2].

Важливе місце у колі даних задач займають радіовимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів, які усе більшою мірою використовуються у радіолокаційній техніці, радіоастрономії, радіопеленгації, телекомутаційних засобах зв’язку, безпечних приладах та системах діагностики людини, неруйнуючому контролі складу речовин та інших галузях науки і техніки [3], [4].

Для проведення вимірювання подібних сигналів використовуються радіометричні системи (РС) з різними методами їх перетворення і вимірювання [5], [6]. При цьому розробляються одноканальні, двоканальні, багатоканальні вимірювальні НВЧ-системи, використовуються методи порівняння, прямого і непрямого вимірювання, дистанційного і контактного (аплікаторного) зняття інформації приймальними антенами та ін. [7], [8]. Все це різноманіття підходів вимагає зробити огляд методів та засобів вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів, що адаптовані під рішення конкретних завдань, а також провести їх класифікацію.

Метою даної роботи є проведення огляду та класифікації методів та засобів вимірювання параметрів низькоінтенсивних сигналів НВЧ-діапазону.

Основна частина

Класифікація радіотехнічних систем (рис. 1) визначається в першу чергу їхнім призначенням: системи передачі інформації (радіотелеметрія, радіозв’язок, радіоуправління і т.п.); системи добування інформації (радіометрія фізичних і біологічних об’єктів, радіоастрономія, радіолокація та ін.); системи радіопротидії [9], [10].

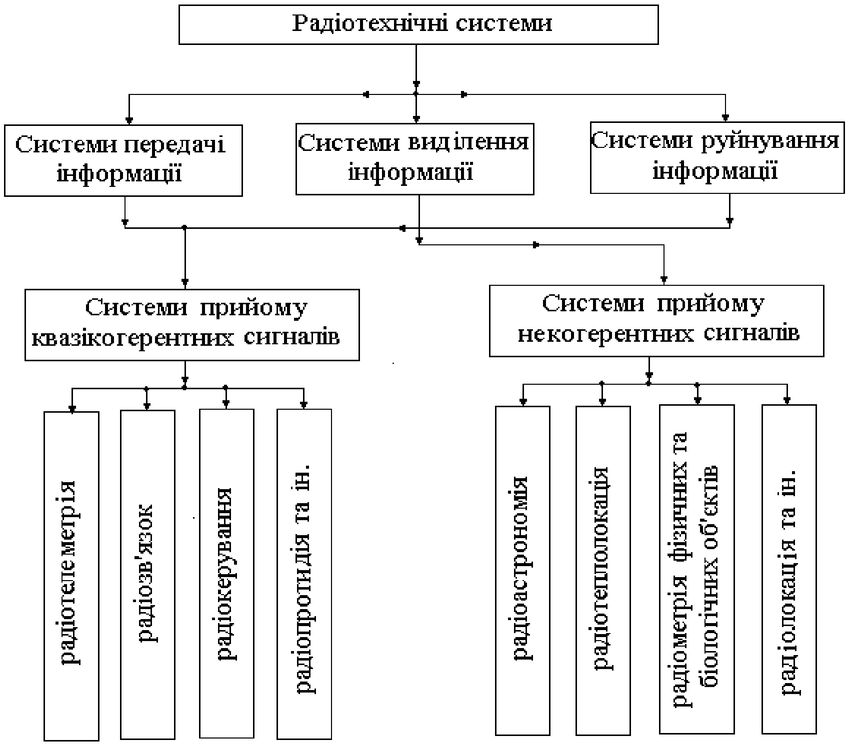


Рисунок 1 – Класифікація радіотехнічних систем за їхнім призначенням

За видом прийнятих сигналів РТС можна розділити на два великих класи: для прийому квазікогерентних сигналів і некогерентних, головним чином радіотеплових випромінювань – РС. До першого, більш великого класу, належать РТС передачі і руйнування інформації, активних радіолокаційних і радіонавігаційних систем. До другого класу відносяться РС, які знаходять застосування при дистанційному і контактному дослідженні складу і властивостей фізичних і біологічних об’єктів, радіотеплолокації, радіоастрономії, для виявлення об’єктів на фонових поверхнях та ін.

Радіометричні системи підрозділяються також за функціональним призначенням, за місцем установки (стаціонарні, бортові, переносні), за способом керування і комутації, за видом живлення. Розрізняють РС і за безліччю конструктивно-експлуатаційних і економічних показників: стабільністю, точністю і часом настроювання, ергономічністю, надійністю, ремонтопридатністю, енергетичною економічністю, масою і габаритами, вартістю, мобільністю та ін.

Намітився новий напрям у галузі вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів – вивчення природи електромагнітних властивостей складних речовин шляхом вимірювання і дослідження потужності електромагнітних випромінювань (ЕМВ). Вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів, що представляють як власні радіотеплові ЕМВ від фізичних або біологічних об’єктів, так і відбиті від них зовнішні зондувальні випромінювання низької інтенсивності, складає 50 – 60% від загального об’єму вимірювальних параметрів в НВЧ-діапазоні [7].

У зв’язку з необхідністю вивчення підповерхневої (глибинної) температури стали активно розвиватися радіотеплові методи вимірювання ЕМВ від джерел термонеоднорідностей. Використання більш довгих хвиль (сантиметрового і дециметрового діапазонів) дозволило шляхом зміни частоти вимірювати радіотеплові випромінювання речовини з високим вмістом води від градієнтів температури з глибини до 8 – 10 сантиметрів.

Оцінка коефіцієнтів ослаблення, поглинання і відбиття, повного опору НВЧ-ланцюгів, визначення коефіцієнтів стоячої хвилі, підсилення НВЧ-вузлів та інших параметрів тісно пов'язана з прямим вимірюванням енергетичних параметрів і непрямим визначенням відповідних коефіцієнтів та характеристик пристроїв [11], [12].

Залежно від рівня потужності низькоінтенсивних сигналів, яка оцінюється, вимірювачі можна поділити на кілька груп (рис. 2).

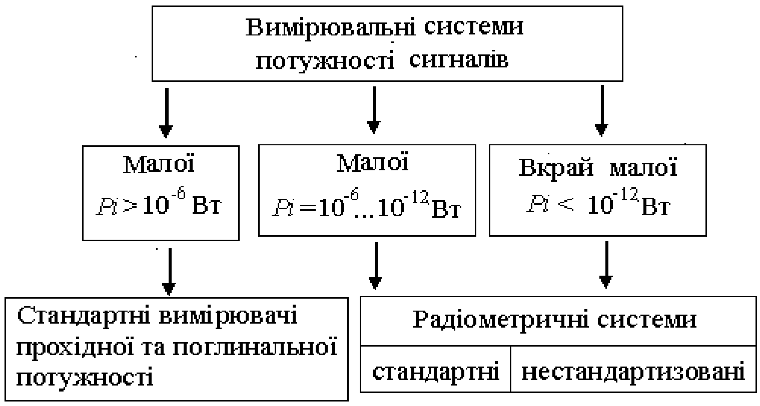


Рисунок 2 – Класифікація РС за потужністю НВЧ-сигналів

Оскільки у приймально-перетворювальному тракті (ППТ) РС здійснюється виділення корисних сигналів із всієї сукупності сигналів і перешкод і посилення перших до рівня, необхідного для нормальної роботи наступних каскадів РС, то варто розглянути його можливі варіанти побудови (рис. 3) і оцінити достоїнства і недоліки. Так, у РС із прямим перетворенням сигналу (рис. 3, а) вхідними ланцюгами (ВЛ) резонансного або фільтрового типу здійснюється частотна вибірковість, а потім провадиться демодуляція (Д) сигналу і його наступне посилення (ПЧМ) на частоті модуляції. Найпростішими пристроями цього типу історично першими були детекторні РС, головним недоліком яких була низька чутливість, у зв'язку з чим їхнє застосування було обмежено НВЧ-системами аналізу електромагнітної обстановки і т.п. Застосування більш складних демодуляторів, наприклад автокореляційного, може дозволити реалізувати прості і надійні РС сигналів відносної фазової телеграфії з високою завадостійкістю [2].

Різновидом РС із прямим перетворенням сигналу є пристрої з прямою гетерогенізацією НВЧ-сигналу на відеочастоту за допомогою змішувача (ЗМ) і гетеродина (G) (рис. 3, б). У цьому випадку основне посилення і вибірковість здійснюються на проміжній частоті, при цьому підвищені вимоги пред'являються до динамічного діапазону перетворювача частоти, його коефіцієнта шуму і рівня інтермодуляційних перешкод. Одноканальні РС із незалежним гетеродином успішно можуть використовуватися в доплерівських радіолокаційних системах для вимірювання швидкості об'єкта спостереження. Квадратурні перетворювачі частоти дозволяють здійснювати демодуляцію сигналу з будь-якими видами модуляції при збереженні інформації про амплітуду і фазу вихідного радіосигналу [11].

У РС прямого посилення (рис. 3, в), для підвищення чутливості за рахунок зниження власних шумів, у вхідному ланцюзі здійснюють попередню частотну вибірковість і погоджують антену із входом малошумливого підсилювача (МШП), а наступний за тим підсилювач радіочастоти (ПРЧ) забезпечує основне посилення тракту і частотну фільтрацію сигналу від перешкод [5-7]. Настроювання на корисний сигнал проводиться синхронною перебудовою за частотою вхідного ланцюга, МШП

і підсилювача радіочастоти. Незважаючи на використання ефективних МШП і складних частотно-вибірних ланцюгів, такі РС через труднощі технічного характеру застосовують лише при порівняно невисоких вимогах до чутливості і вибірковості.

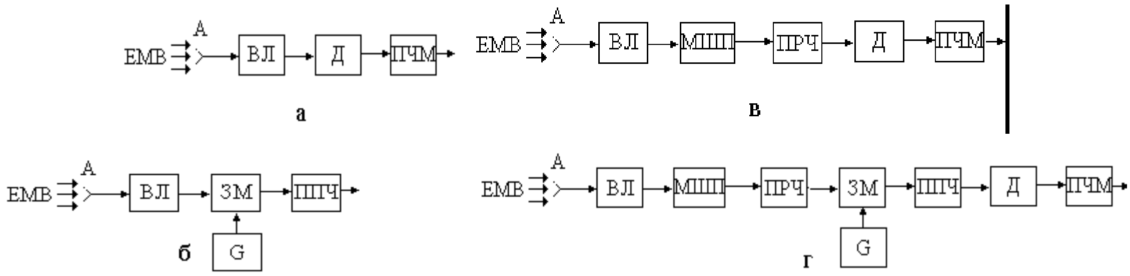


Рисунок 3 – Структурні схеми підсилювально-перетворювальних трактів: а) з прямим перетворенням сигналу; б) з прямим перетворенням сигналу гетеродинуванням; в) тракт прямого посилення; г) супергетеродин

У РС прямого посилення функції МШП і ПРЧ можуть виконуватися різними регенеративними підсилювачами, у яких у коливальну систему в сигнальному тракті вноситься обумовлений різними фізичними явищами негативний диференціальний опір, що забезпечує посилення за потужністю за рахунок перекачування енергії від джерела живлення. Регенеративні підсилювачі можуть мати досить малі коефіцієнти шуму і значні посилення за потужністю, однак вони відносно вузькосмугові і вимагають підвищеної уваги до питань забезпечення стійкості стосовно дестабілізуючих факторів [10].

Основним типом побудови ППТ є супергетеродин (рис. 3, г) з одно- або багаторазовим перетворенням частоти. Перенос сигналу на більш низьку фіксовану частоту дозволяє реалізувати в підсилювачі проміжної частоти (ППЧ) стійке посилення, забезпечити високу частотну вибірковість, а також оптимальну фільтрацію сигналу від перешкод за допомогою погоджених фільтрів [13], [14]. Однак при цьому викликаються і такі небажані ефекти, як утворення побічних каналів прийому, вплив нестабільності частоти гетеродина на настроювання, можливість випромінювання коливань гетеродина через антену. Така можливість найбільш реальна за відсутності ПРЧ (МШП), коли першим каскадом ППТ є перетворювач частоти, як це найчастіше має місце в РС міліметрового і субміліметрового діапазонів. Досить високі вимоги до вибірковості по сусідньому і дзеркальному каналах виконуються в супергетеродинах з послідовним багаторазовим перетворенням частоти. Чутливість РС значною мірою залежить від коефіцієнта шуму вхідних елементів і посилення за потужністю перших каскадів ППТ [5], [8].

Перші спроби застосування в колишньому СРСР високочутливих РС НВЧ-діапазону у наукових дослідженнях відносяться до випадків виміру інтенсивності радіотеплового ЕМВ при оцінці температури об'єктів [15], [16]. Розробка РС для дослідження прикладних задач за рівнем НВЧ-випромінювання пов'язана з вирішенням деяких складних завдань: забезпечення високої чутливості і точності приладів, проведення узгодження вхідних антен з об'єктами дослідження, забезпечення необхідної глибини проникнення хвилі і виміру абсолютних значень ЕМВ, джерелом яких є температурна локалізація та ін.

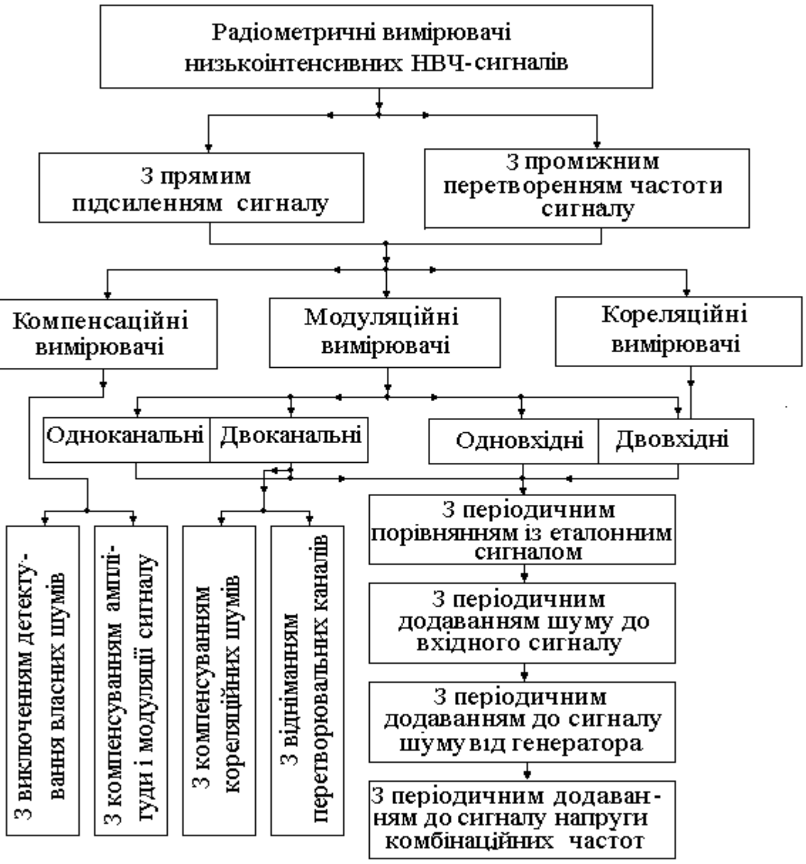


Рисунок 4 – Класифікація радіометричних вимірювачів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів

Проектування РС для вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів має свої особливості і, як правило, проводиться з використанням компенсаційних, модуляційних і кореляційних методів [5], [6]. При цьому компенсаційні РС будуються з виключенням детектування власних шумів і з компенсуванням амплітуди і модуляції сигналу. Модуляційні і кореляційні РС – з компенсуванням кореляційних шумів, з відніманням перетворювальних каналів, з періодичним порівнянням із еталонним сигналом, з періодичним додаванням шуму до вхідного сигналу, з періодичним додаванням до сигналу шуму від генератора, з періодичним додаванням до сигналу напруги комбінаційних частот. Класифікація радіометричних вимірювачів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів наведена на рис. 4.

При вимірюванні параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів методами періодичного порівняння необхідно враховувати умови поширення ЕМВ у середовищі, де зворотна величина частоти поля визначає час становлення самого поля в ділянці з лінійним розміром скін-слою: $1 / \omega = t$. Для вирішення перерахованих вище завдань можуть бути використані всі відомі види ЕМВ. Особливо активно розробляються методи вимірювання низькоінтенсивних випадкових (шумових) НВЧ-сигналів. Ці методи можливо класифікувати як дистанційні і контактні. Залежно від виду РС та антенних систем, частотного діапазону, режиму калібрування характер одержуваної інформації може бути різний. Так, РС дистанційної дії, при вимірюванні радіотеплового ЕМВ, реєструють потужність сигналу, пропорційну величині радіояскравої температури джерела (об’єкта) випромінювання. При цьому залежно від довжини хвилі у формуванні цього

випромінювання буде брати участь різної товщини скін-слой. РС аплікаторної дії реєструють потужність сигналу, пропорційну інтегральній температурі скін-слою, величина якого визначається довжиною хвилі приймача і діелектричними характеристиками джерела (об'єкта) випромінювання. Обидва методи забезпечують одержання карт розподілу контрастів поверхневих і глибинних потужностей радіотеплового ЕМВ локальних джерел, а за наявності систем термостабілізації і еталонів радіотеплового ЕМВ – карт абсолютних значень інтегральної потужності ЕМВ з глибини джерела випромінювання та глибинних профілів потужності шумових низькоінтенсивних сигналів від локальних джерел обраних ділянок середовища.

Дистанційні методи мають недоліки, які полягають у тому, що похибка вимірювання абсолютного значення потужності радіотеплового ЕМВ істотно залежить від випромінюючої здатності об'єкта і умов, у яких проводиться вимірювання. Внаслідок цього при використанні зазначених методів не вдається отримати точні значення абсолютної температури, хоча температурні контрасти глибинної температури можуть бути зафіксовані досить точно.

З огляду на високу інформативність абсолютних значень глибинної температури, за рубежем і в нашій країні активно розробляються контактні методи, які реалізуються РС НВЧ-випромінювання з різними варіантами антен-аплікаторів. При абсолютних вимірюваннях потужності радіотеплового ЕМВ необхідно враховувати вплив неузгодженості контактної антени з об'єктом дослідження на точність вимірювання радіояскравої температури неоднорідностей просторово неоднорідних середовищ. У зв'язку із цим з'являються теоретичні дослідження й технічні розробки можливостей усунення зазначеної похибки вимірювання. Пропонуються методи компенсації впливу коефіцієнта відбиття, здійснювані за допомогою регульованого підсмуговування, методи виключення втрат за рахунок відбиття на границі двох середовищ, методи термодинамічної рівноваги шляхом нагрівання антени та високочастотного тракту та ін. Ці методи не завжди виправдано ускладнюють РС і при цьому не виключають похибки вимірювання.

При контактному способі прийому радіотеплового ЕМВ просторово неоднорідних середовищ також неминуча похибка вимірювання, що виникає через відбиття випромінювання на границі «антена-об'єкт». Коефіцієнти відбиття можуть істотно відрізнятися за рахунок розходження діелектричних властивостей об'єкта. Однак впливу цього коефіцієнта можна уникнути при відносному способі вимірювань, коли реєструється різниця температур у симетричних точках. Для цього часто використовують двоантенні модуляційні РС, які вимірюють різницю інтенсивностей ЕМВ від сусідніх або вилучених ділянок одного об'єкта або двох незалежних об'єктів. Такі РС повинні вимірювати різницю рівнів малих ЕМВ, значення яких порівнянні не тільки із шумами, але і з похибками модуляційного тракту порівняння, у якому вимірюваний сигнал рівняється із власним шумом.

Проведений огляд та класифікація методів та засобів вимірювання низькоінтенсивних НВЧ-сигналів показує, що розробити універсальну нестандартизовану радіометричну апаратуру з високим рівнем чутливості, яка забезпечувала б у широкому діапазоні робочих частот достовірний прийом інформативних параметрів слабких НВЧ-сигналів, інтенсивність яких нижча за рівень власних шумів апаратури, сьогодні не можливо. Однієї з головних причин є вхідні високочастотні ланцюги РС (перемикачі, циркулятори, змішувачі, подвійні хвилеводні трійники та ін.), що обмежують смугу прийнятих частот порівнюваних широкосмугових ЕМВ об'єктів та знижують їх чутливість. Тому розробка вимірювальних РС здійснюється під рішення конкретних завдань.

З розвитком науково-технічного прогресу з'являються і нові постановки задач, які вимагають розробки нових зразків надійних і точних засобів вимірювання низько-інтенсивних НВЧ-сигналів. Їхнє застосування може дозволити автоматизувати багато виробничих процесів виготовлення виробів, підвищити ефективність і якість продукції, що випускається, забезпечити проведення скринінгового контролю стану здоров'я населення з метою раннього виявлення пухлинних процесів та ін.

Висновки

Застосування проведеного у статті огляду і класифікації методів і засобів вимірювання параметрів низькоінтенсивних НВЧ-сигналів буде доцільно при:

– аналізі наявних розробок високочутливих засобів вимірювання параметрів зазначених сигналів;

– визначенні напрямків подальших робіт з поліпшення метрологічних характеристик існуючої радіометричної апаратури;

– створенні нових зразків вимірювальної НВЧ-техніки.

Література

1. Клич С.М. Радиоприемные устройства миллиметрового диапазона волн // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника / С.М. Клич. – М., 1989. – Т. 39.
2. Физическая энциклопедия. – Режим доступа : www/femto.com.ua.
3. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / [Валитов Р.А., Скресанов В.Н., Фисун А.И. и др.] ; под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М. : Радио и связь, 1984. – 296 с.
4. Yansen I.A. Precision Measurement of Bach Scatterring cross section as a Function of Frequency / I.A. Yansen // IEEE Trans on Instrumentation and Measurement. – 1976. – V. 25, № 4. – P. 363-370.
5. Есепкина Н.А. Радиотелескопы и радиометры / Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. – М. : Наука, 1972. – 416 с.
6. Николаев А.Г. Радиотеплолокация / А.Г. Николаев, С.В. Перцов. – М. : Сов. радио, 1964. – 335 с.
7. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / [Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.П. и др.]. – Житомир : «Волынь», 2003. – 408 с.
8. Скрипник Ю.О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону : навчальний посібник / Скрипник Ю.О., Манойлов В.П., Яненко О.П. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 374 с.
9. Выставкин А.Н. Приемники миллиметровых и субмиллиметровых волн / А.Н. Выставкин, В.В. Мигулин // Радиотехника и электроника. – 1967. – Т. 12, № 11. – С. 1989-1998.
10. Арчер Дж.У. Малошумящие гетеродинные приемники ближнего миллиметрового диапазона для радиоастрономических наблюдений / Дж.У. Арчер // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 1. – С. 119.
11. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / Гоноровский И.С. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.
12. Билько М.И. Измерение мощности на СВЧ / М.И. Билько, А.К. Томашевский. – М. : Радио и связь, 1986. – 167 с.
13. Божков В.Г. Создание квазимонолитного компактного усилительно-преобразовательного модуля для многолучевого приемника КВЧ-диапазона // Физика микроволн : сборник отчетов по научным проектам МНТП России. Т. 2 / В.Г. Божков, В.А. Геннеберг, А.Д. Фригер. – Нижний Новгород, 1996. – С. 237.
14. Mixer conversion loss and receiver single-sideband noise temperature improvement by return of signal converted in image / Yu.A. Dryagin, L.I. Fedoseev, L.M. Kukin [и др.] // MSMV'2001 Symposium Proceeding, (Kharkov. June 4 – 9, 2001). Vol. 2. – P. 735-737.
15. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел / В.С. Троицкий // Изд. ВУЗов. Радиофизика. – 1981. – Т. 24, № 9. – С. 1054-1061.
16. Штейншлейгер В.Б. Об одном радиофизическом методе обнаружения температурных аномалий внутренних органов человека / В.Б. Штейншлейгер, Г.С. Мисежников, А.Г. Сельский // УФН. – 1981. – Т. 134, вып. 1. – С. 163-164.

Literatura

1. Klich S.M. Moscow: Itogi nauki i tehniki. Ser. Radiotehnika. 1989.Vol. 39.
2. Available at:www/femto.com.ua.
3. Valitov R.A. Moscow: Radio i svjaz'. 1984. 296 p.
4. Yansen I.A. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement.1976. Vol. 25. № 4. P. 363-370.
5. Esepkina.N.A. Moscow: Nauka. 1972. 416 p.
6. Nikolaev A. G. Moscow: Izd. Sov. Radio. 1964. 335 p.
7. Skripnik Ju.A. Zhitomir: Volyn'. 2003. 408 p.
8. Skripnik Ju.A. Zhitomir: ZhITI. 2001. 374 p.
9. Vystavkin A.H. Moscow: Radiotehnika i jelektronika. Vol. 12. 1967. P.1989.
10. Archer Dzh. TIIJeR.Vol. 73. № 1. 1985. P. 119.
11. Gonorovskij I.S.Moscow: Radio i svjaz'. 1986. 512 p.
12. Bil'ko M.I. Moscow: Radio i svjaz'. 1986. 167 p.
13. Bozhkov V.G. Sbornik otchetov po nauchnym proektam MNTP Rossii "Fizika mikrovoln". Vol. 2. Nizhnij Novgorod. 1996. P. 237.
14. Dryagin Yu.A.MSMV`2001 Symposium Proceeding.Kharkov. June 4-9, 2001.Vol. 2.P. 735-737.
15. Troickij V.S. Izd. VUZov, Radiofizika. 1981. Vol 24. №9. P. 1054-1061.
16. Shtejnshlejger V.B UFN**.** 1981. Vol.134. № 1. P.163-164.

В.П. Куценко

Обзор и классификация методов и средств измерения параметров низкоинтенсивных СВЧ-сигналов

В статье проведен обзор и классификация методов и средств измерения параметров низкоинтенсивных СВЧ-сигналов. Рассмотрена классификация радиотехнических систем по их функциональному назначению, по виду и мощности измеряемых сигналов, по структуре преобразования и измерения. Сделан обзор особенностей устройства приемно-преобразовательного тракта радиометров и измерения низкоинтенсивных СВЧ-сигналов с помощью контактных и дистантных методов.

V.P. Kutsenko

Review and Classification of Methods and Means of Measuring Parameters of Low-intensity MICROWAVE Signals

In the article the review and classification of methods and means of measuring parameters of lowintensive MICROWAVE signals. The classification of radio engineering systems on their functional purpose, according to the type and capacity of the measured signals, on the structure transformation and measurement. A review of the features of the device receiving-conversion tract radiometers and measurement of lowintensive MICROWAVE signals with the help of the contact and distant methods.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2011.